مدل‌سازی پارامترهای جریان در مسیر تنداب سرریزهای با تغییر شیب ناگهانی (مطالعهٔ موردی: سرریز سد سورک) ★

«یادداشت پژوهشی»

سهیل عباسی(۱) حسین صمدی بروجنی(۲) روح‌الله فتاحی نافچی(۳) بهزاد قربانی(٤)

چکیده *یکی از موارد مهم در طراحی تنداب سرریزها، بررسی خصوصیات و شرایط جریان در مسیر تنداب به‌واسطهٔ فوق بحرانی بودن جریان است. در تحقیق حاضر ویژگی‌های هیدرولیکی جریان در تنداب سرریز سد سورک بااستفاده از مدل‌سازی فیزیکی و عددی مورد بررسی قرار گرفته‌است. مدل از جنس پلکسی‌گلاس با مقیاس ۱:۵۰ ساخته شد و برای مدل‌سازی ریاضی از نرم‌افزار فلوئنت استفاده گردید. آزمایش‌ها در ۵ دبی متفاوت انجام گرفت و پارامترهای فشار، سرعت و عمق جریان در محور مرکزی و کنار دیواره برداشت گردید. نتایج نشان داد در بین پارامترهای اندازه‌گیری‌شدهٔ نرم‌افزار فلوئنت، پارامتر سرعت با کمترین درصد خطا (٤/۳ درصد) و پارامتر عمق با بیشترین درصد خطا (١٦/٩ درصد) شبیه‌سازی شده‌است. همچنین ضریب نش- ساتکلیف و ضریب تعیین محاسبه‌شده برای پارامترهای مورد نظر نشان دادند که نرم‌افزار فلوئنت توانایی شبیه‌سازی جریان را برروی سرریزهای با تغییر شیب ناگهانی دارا می‌باشد. باتوجه به نتایج شبیه‌سازی‌شده و معیارهای RMSE و NRMSE می‌توان دریافت در نرم‌افزار فلوئنت درصورت استفاده از روش حل عددی حجم محدود، مدل آشفتگی k-ε RNG، روش تصحیح فشار SIMPLE و روش دو فازی VOF، بیشترین دقت در محاسبهٔ پارامترهای فشار، سرعت و عمق جریان آب در تنداب سرریز مورد مطالعه حاصل می‌گردد.*

واژه‌های کلیدی فشار، سرعت، سرریز، مدل فیزیکی، مدل‌سازی عددی.

Modeling of the Flow Parameters of Chute Spillway with Change Slope (Case Study: Surk Dam Spillway)

S.Abbasi H.Samadi-Boroujeni R.Fattahi Nafchi B.Gorbani

Abstract *One of the important issues in the design of chute spillway is to study the flow characteristics in the chute path because the flow is supercritical. In this study, the hydraulic characteristic of flow in the chute spillway of Surk dam has been investigated using both physical and numerical modeling. The plexiglass physical model was made with a geometry scale of 1:50 and FLUENT software was used for mathematical modeling. The experiments were carried out at 5 different discharges and the parameters of pressure, velocity and depth of flow were measured in the central axis and at the side of the wall. The results showed that among the measured parameters of FLUENT model, the velocity parameter was simulated with the lowest average error rate (4.3%) and the depth parameter with the highest average error rate (16.9%). Also, the Nash-Sutcliff coefficient and the correlation coefficient for the parameters, indicated that FLUENT software has a good ability to simulate flow characteristics over the chute spillway with a suddenly change slope. Regarding the RMSE and NRMSE criteria, FLUENT model have had the highest accuracy in calculating the flow parameters by using finite volume numerical method, turbulent model k-ε, RNG, SIMPLE pressure correction method and VOF two-phase method.*

Key Words Pressure, Velocity, Spillway, Physical and Numerical Modeling.

★تاریخ دریافت مقاله۹۵/۸/۲٦ و تاریخ پذیرش آن۹۷/۲/۱۸ می‌باشد.

(۱) نویسندهٔ مسئول، دانشجوی کارشناسی ارشد سازه‌های آبی، گروه مهندسی آب، دانشگاه شهرکرد.

Email: Soheil.abbasi91@yahoo.com.

(۲) دانشیار، گروه مهندسی آب، دانشگاه شهرکرد.

(۳) دانشیار، گروه مهندسی آب، دانشگاه شهرکرد.

(٤) دانشیار، گروه مهندسی آب، دانشگاه شهرکرد.

مقدمه

سرریز یکی از سازه‌های مهم هر سد برای عبور سیلاب‌ها می‌باشد که تنداب آن باتوجه به شرایط توپوگرافی و شیب طبیعی زمین در مسیر ممکن است با شیب‌های مختلف طراحی و اجرا شود این امر تغییر شیب‌هایی ناگهانی در تنداب به‌وجود می‌آورد. بدیهی است در این وضعیت، سازهٔ تنداب باید از نظر شرایط هیدرولیکی، به‌گونه‌ای طراحی شود که پدیده‌هایی همچون کاویتاسیون، ایجاد امواج ثانویه و... در محل تغییر شیب ناگهانی حادث نشوند و شرایط عبور ایمن سیلاب فراهم باشد [1].

براساس اطلاعات موجود، در موارد زیادی دلیل تخریب سرریزها، طراحی نامناسب تنداب‌ها بوده‌است. به دلیل اقتصادی و هیدرولیکی، مناسب‌تر است که تنداب، مستقیم و شیب کف آن از شیب بحرانی بیشتر باشد. با این‌حال شرایط زمین‌شناسی و مورفولوژیکی شیب دره و تکیه‌گاه که تنداب باید از آن پیروی کند، گاهی ممکن است موجب شود که در مسیر تنداب خم حاصل شود و هم‌چنین شیب کف آن در مسیر تغییر نماید. به‌طور کلی اصول زیر در طراحی تنداب مورد توجه قرار می‌گیرند [2].

۱. هرگونه هدایت و یا تغییر مسیر جریان، باید محدود به مکان‌هایی واقع در بالادست سازهٔ کنترل (جایی که سرعت جریان کم است) باشد.

۲. در منطقه‌ای که جریان شتاب می‌گیرد، هدایت جریان باید مستقیم و متقارن باشد.

۳. هنگام عبور جریان از روی سازهٔ کنترل، جریان به‌سرعت شتاب می‌گیرد. پایین‌دست آستانه، جریان فوق بحرانی است، سرعت آن افزایش می‌یابد و امکان ایجاد کاویتاسیون را فراهم می‌کند؛ بنابراین هرگونه تغییر در انحنای دیوارهٔ هادی جریان و کف تنداب واقع در پایین‌دست آستانه، باید با دقت زیاد انجام شود. ازآن‌جایی‌که پهنه‌های بالادست آستانه وابسته به دبی عبوری از مقطع کنترل می‌باشد و اغلب پهنا در مقطع کنترل نسبت‌به تنداب بزرگ‌تر است، بنابراین یک تبدیل بین این دو لازم است؛ البته پهنای تنداب به‌وسیلهٔ عواملی از قبیل توپوگرافی، هزینهٔ ساخت و پهنای رودخانهٔ پایاب محدود می‌شود.

بنابراین بررسی رفتار هیدرولیکی و شناخت پارامترهای هیدرولیکی سرریز در دبی‌های مختلف به‌کمک مدل‌های فیزیکی و عددی امکان‌پذیر است. تغییرشیب‌های ناگهانی در این نوع سازه‌ها می‌تواند زمینه‌ساز جدایش جریان شود و الگوی جریان را تغییر دهد که این امر می‌تواند مسائلی را در پایداری تنداب ایجاد نماید؛ بنابراین بررسی پارامترهای جریان (توزیع فشار و سرعت) در تغییر شیب‌های ناگهانی به‌خصوص در جریان‌های با سرعت زیاد که می‌تواند موجب عملکرد نامطلوب هیدرولیک جریان و ایجاد خسارت‌های شدید و یا شکست سازه گردد، کاملاً الزامی است [1]. مهری [۳] به شبیه‌سازی رفتار هیدرولیکی جریان برروی سرریز سد بالارود بااستفاده از مدل فیزیکی با مقیاس کوچک پرداخت. در این تحقیق مدل فیزیکی با مقیاس ۱:۱۱۰ ساخته شد و در ۱٤ دبی مختلف پارامترهای مهم جریان شامل عمق، سرعت، فشار، نوسانات لحظه‌ای فشار، مشخصات جت پرتابی و بی‌نظمی‌های جریان با هدف حصول اطمینان از عملکرد مطلوب سرریز در دوران بهربرداری مورد اندازه‌گیری و مشاهده قرار گرفت. اهم نتایج وی نشان داد که تراز حداکثر بازشدگی دریچه‌های سرریز و ارتفاع دیواره‌های جام پرتابی نیاز به اصلاح دارند و باتوجه به این‌که ضریب خوردگی اندازه‌گیری‌شده بیش از مقدار بحرانی آن است احتمال به‌وجود آمدن پدیدهٔ کاویتاسیون وجود ندارد. عارف پور [٤] به بررسی هیدرودینامیک جریان و منحنی تراژکتوری جت پایین‌دست در پرتابهٔ جامی‌شکل سرریز سد بالارود در مقیاس ۱:٤۰ پرداخته‌است که نتایج وی حاکی از قابل قبول بودن دامنهٔ تغییرات فشارهای دینامیکی بوده‌است. دورقی [۵] به بررسی رفتار هیدرودینامیک آب برروی

سرریز اوجی سه‌دهانه و تعیین رابطهٔ دبی اشل و بهینه‌سازی دیواره‌های هدایت سرریز سد بالارود در مقیاس ۱:٤۰ پرداخت. در این تحقیق وی در ابتدا به بهینه‌سازی دیواره‌های هدایت سرریز پرداخت و بهینه‌سازی هم به‌صورت کمی و هم به‌صورت کیفی (مشاهدهٔ الگوی جریان، امواج عرضی، تلاطم و جداشدگی جریان) انجام شد. این تحقیق در ٦ دبی مختلف پارامترهای مهم جریان شامل عمق، سرعت، فشار استاتیکی، نوسانات لحظه‌ای فشار و بی‌نظمی‌های جریان را با هدف حصول اطمینان از عملکرد مطلوب سرریز در دوران بهره‌برداری، مورد اندازه‌گیری و مشاهده قرار داد. بررسی عمق آب روی سرریز و کفایت دیواره‌ها مشخص کرد که از دبی ۲۷٤ لیتر بر ثانیه بلافاصله بعد از تبدیل ابتدایی، عمق آب به بالای دیوارهٔ سرریز می‌رسد که نیازمند اصلاح می‌باشد. حداقل ضریب خوردگی که در آستانهٔ سرریز و در دبی ۱۹۰/۳ لیتر بر ثانیه رخ داد، ۰/۸۷ بود ولی باتوجه به ضریب خوردگی بحرانی (α) احتمال رخ دادن پدیدهٔ کاویتاسیون در طول محور سرریز وجود ندارد.

علاوه‌بر مدل‌های فیزیکی، درمورد استفاده از مدل‌های عددی و کامپیوتری دربارهٔ جریان روی سرریزها کارهای زیادی صورت گرفته‌است. ساویج و جانسون [6] به بررسی پارامترهای جریان برروی یک سرریز اوجی به‌وسیلهٔ مدل فیزیکی و مدل عددی (FLOW 3D) با روش متوسط‌گیری رینولدز (Reynolds- Averaged Navier- Stokes) پرداختند. آنها اظهار داشتند که همواره روش‌های عددی درصورتی‌که معادلات حل جریان به‌درستی انتخاب کردند جایگزین خوبی برای مدل‌های فیزیکی می‌باشند. ایشان از دیگر مزیت‌های مدل عددی، صرفه‌جویی در هزینه و زمان را برشمردند. کسدی [7] براساس جریان پتانسیل، به‌صورت دوبعدی فشار روی تاج سرریز را به‌وسیلهٔ مدل عددی بررسی کرد که نتایج آن تطابق خوبی با نتایج آزمایشگاهی داشت. در اولسن و کالویج [8] بااستفاده از معادلات رینولدز میانگین‌گیری‌شده در زمان و نیز معادلات k -ε استاندارد به‌روش حجم محدود، جریان عبوری از روی سرریز را به‌صورت دوبعدی و سه‌بعدی تحلیل کردند. یوامی و همکاران [9] با ترکیب دو روش حجم محدود و المان محدود، جریان سطح آزاد روی سرریز را به‌صورت دوبعدی با شبکهٔ نامنظم مثلثی‌شکل شبیه‌سازی کردند. چنرسری و همکاران [10] به بررسی جریان در یک سرریز پله‌کانی و هم‌چنین بدون پله بااستفاده از روش‌های عددی پرداختند. این محققان برای اجرای مدل عددی، روش VOF را برای حل جریان دوفازی (آب و هوا) و مدل K- ε را برای حل آشفتگی جریان انتخاب کردند. حیدری [11] نیز جریان آشفتهٔ عبوری روی سرریز اوجی را با نرم‌افزار فلوئنت به‌صورت دوبعدی بررسی کرد.

در این راستا در این پژوهش به بررسی پارامترهای هیدرولیکی جریان در سرریز سد سورک و تغییر شیب ناگهانی موجود در تنداب این سازه با بهره‌گیری از مدل فیزیکی و مدل عددی فلوئنت، در ٤ دبی مختلف پرداخته شده‌است. ضمن اندازه‌گیری مشخصه‌های جریان در طول سرریز، بررسی تغییرات فشار، تغییرات سرعت و تغییرات عمق آب بااستفاده از شبیه‌سازی جریان در نرم‌افزار فلوئنت مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفته و کاربرد این مدل در جریان از روی این قبیل سازه‌ها ارزیابی شده‌است.

روش تحقیق

موقعیت و مشخصات سد و سرریز سد سورک

سد سورک، سدی خاکی با هستهٔ رسی است که دارای یک سرریز اوجی با تنداب می‌باشد. این سد در نزدیکی روستای سورک در ٤٥ کیلومتری شهرکرد، مرکز استان چهارمحال و بختیاری قرار دارد. حداکثر ارتفاع سد از بستر ۳۹ متر، طول تاج سد ۵۹۰ متر، حجم کل بدنهٔ این سد ۱۲۵۰۰۰۰ مترمکعب، حجم مفید مخزن MCM ۲۵

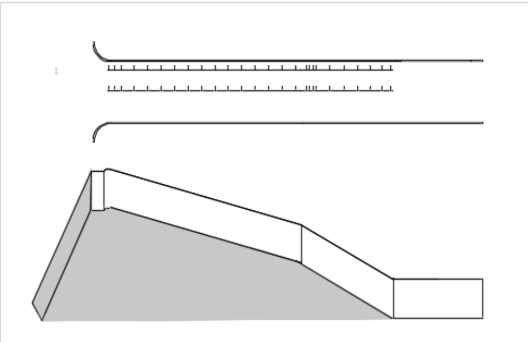
و حجم مردهٔ آن MCM ۱/۱۵ است. عرض آستانهٔ سرریز و تنداب برابر ۲۰ متر و شیب وجه بالادست آن ۱:۱ می‌باشد. باتوجه به مطالعات هیدرولوژی منطقه دبی طرح این سرریز ۲۳۱ مترمکعب برثانیه درنظر گرفته شده‌است. تنداب این سرریز در ابتدا زاویه‌ای ۱٤ درجه نسبت‌به افق دارد که در قسمت انتها به‌طور ناگهانی با زاویهٔ ۲۸ درجه نسبت‌به افق به حوضچهٔ آرامش متصل می‌گردد.

ساخت مدل فیزیکی سرریز

آزمایش‌های این تحقیق در فلوم شیب‌پذیر به‌طول ۲۰ متر و ارتفاع و عرض ٦۰ سانتی‌متر مستقر در آزمایشگاه هیدرولیک دانشگاه شهرکرد انجام گرفته‌است به‌منظور انجام آزمایش‌ها، مدل فیزیکی درانتهای این فلوم نصب شده‌است. سیستم تغذیه و گردش آب نیز به تبع همان سیستم فلوم مذکور می‌باشد که شامل ایستگاه پمپاژ با ظرفیت ۷۰ لیتر بر ثانیه است. برای اندازه‌گیری دبی جریان، از سرریز مثلثی واقع در انتهای سیستم استفاده می‌شود. باتوجه به امکانات آزمایشگاه، مقیاس مدل طوری تعیین شده‌است که اولاً فضای آزمایشگاهی از نظر هندسی کفایت ابعاد را داشته باشد، ثانیاً حداکثر دبی مورد نیاز در آزمایش مدل در رنج دبی سیستم تغذیه قرار گیرد. باتوجه به مطالب گفته‌شده و بررسی-های صورت‌گرفته مقیاس مدل ۱:۵۰ انتخاب شده‌است که با این مقیاس امکان تشابه چه از نظر هندسی و چه از نظر دینامیکی فراهم می‌گردد. در این تحقیق برای ساخت مدل از مصالحی با جنس پلگسی گلاس استفاده شده‌است. صفحات برش‌خوردهٔ پلگسی به هم وصل می‌شوند و روی شاسی فلزی قرار داده می‌شوند. برای اندازه‌گیری فشار، در سرتاسر سرریز در مناطق با تغییر ناگهانی در شیب و ارتفاع، پیزومترهای با تراکم بیشتر نصب می‌شوند. برای سهولت کار پیزومترها روی یک تابلو قرار داده می‌شوند. برای رسیدن به دقت بیشتر در اندازه‌گیری ارتفاع آب در پیزومترها، تابلو با زاویهٔ ۳۰ درجه نسبت‌به افق نصب می‌گردد. درنهایت با برقراری ٤ دبی مختلف، سرعت جریان به‌وسیلهٔ لولهٔ پیتوت، فشار به‌وسیلهٔ پیزومتر و پارامتر های مهم دیگر مثل عمق با وسایل موجود (عمق‌سنج) اندازه‌گیری می‌گردد. شکل (۱) طرح شماتیک مدل سرریز سد سورک را نشان می‌دهد. در شکل (۲) موقعیت اندازه‌گیری پارامتر-ها نشان داده شده‌است.



شکل ۱ تصاویری از مدل فیزیکی سرریز سد سورک و تابلوی پیزومترها



شکل ۲ مکان اندازه‌گیری پارامترها

تحلیل ابعادی

جریان در سرریزهای همراه تنداب براساس خصوصیات هندسی، سینماتیکی و دینامیکی جریان به‌صورت تابع (۱) به‌دست آمد:

$$F(V, Y, B, P, H, S, Q, \sigma, \rho, \mu, g) = 0 \qquad (۱)$$

که در آن B عرض کانال، V سرعت جریان، P فشار وارد روی سطح سرریز، S شیب طولی کانال، Q دبی جریان، σ کشش سطحی، μ لزجت دینامیکی و ρ چگالی مخصوص سیال می‌باشند. H ارتفاع استاتیکی روی سرریز و Y عمق آب است. تحلیل ابعادی بااستفاده از تئوری π باکینگهام صورت می‌گیرد و پارامترهای مؤثر جریان به‌صورت معادلهٔ (۲) به‌دست می‌آید:

$$f_1\left(\frac{p}{\rho V^2}, \frac{V^2}{gy}, \frac{\mu}{\rho VY}, S, \frac{\sigma}{\rho V^2 Y}, \frac{B}{Y}, \frac{H}{Y}\right) \qquad (۲)$$

باتوجه به این‌که عرض در کانال تغییر نمی‌کند و شیب‌های موجود در مدل در طول آزمایش‌ها ثابت است می‌توان از این دو پارامتر چشم‌پوشی کرد. یکی از مسائل مهم در مدل‌سازی سازه‌های آبی به حداقل رساندن اثر مقیاس می‌باشد و همواره باید توجه نمود برای ناچیز کردن اثر ویسکوزیته باید عدد رینولدز حداقل $۱۰^۵$ و برای به حداقل رساندن اثر کشش سطحی عدد وبر برابر ۱۰۰ باشد تا بتوان اثرات نامطلوب مقیاس را به حداقل رساند. گونزالس و جانسون [12] و باس و هاگر [13] باتوجه به نتایج این پژوهش و وجود شرایط ذکرشده در این پژوهش کشش سطحی و نیروی ویسکوزیته حداقل تأثیر را در اندازه‌گیری‌ها دارند.

مدل عددی فلوئنت

در تحقیق حاضر جریان برروی سرریز سد سورک بااستفاده از مدل فیزیکی بررسی و سپس با مدل فلوئنت به‌روش حجم محدود شبیه‌سازی شد. شبیه‌سازی جریان در سرریز سد سورک با حل معادلات پیوستگی و مومنتوم بااستفاده از مدل‌های آشفتگی، روش‌های بررسی جریان چند فازی، روش حل عددی حجم محدود و الگوریتم‌های حل هم‌زمان سرعت فشار SIMPLE انجام شد و نتایج با مدل فیزیکی مقایسه گردید.

برای شبیه‌سازی جریان آشفتهٔ چند فازی از مدل VOF و برای شبیه‌سازی جریان آشفته از روش آشفتگی k-ε و مدل RNG استفاده می‌شود. در این مدل حل معادلات مربوط به‌روش حجم محدود می‌باشد. روش VOF که غالباً به‌عنوان روش حجم سیال نامیده می‌شود بر این اساس استوار است که دو یا چند سیال با هم ترکیب نمی‌شوند. برای هر فاز یک متغیر در مدل درنظر گرفته می‌شود که همان نسبت حجمی آن فاز در سلول محاسباتی است. در هر حجم کنترل مجموع نسبت‌های حجمی تمامی فازها یک می‌باشد. چن و همکاران [14] بیان می‌کنند که مرز بین دو فاز در روش حجم سیال نقطه‌ای درنظر گرفته می‌شود که مقدار عددی پارامتر کسر حجمی در آن ۰/۵ باشد. اگر نسبت حجمی سیال در سلول به‌صورت aq نشان داده شود یکی از سه شرط (الف) aq = 0 سلول از سیال خالی می‌باشد، (ب) aq = 1 سلول از سیال پر می‌باشد، (ج) ۱> aq > ۰ سلول دارای سطح مشترک بین دو یا چند سیال است، وجود دارد [15]. اندرسون و همکاران [16] از معادلات پیوستگی و مومنتوم ناویر- استوکس به‌عنوان معادلهٔ حاکم بر جریان در سرریز استفاده کردند. در این تحقیق از روش متوسط رینولدزی برای حل معادلات در جریان آشفته استفاده شده‌است. معادلهٔ پیوستگی رینولدز به‌صورت زیر می‌باشد.

$$\frac{\delta p}{\delta t} + \frac{\delta}{\delta x_j}(\overline{pu_J} + \overline{p'u'_j}) = 0 \qquad (۳)$$

فرم کلی معادلهٔ مومنتوم ناویر- استوکس متوسط رینولدزی به‌صورت زیر است:

$$\begin{aligned}
&\frac{\delta}{\delta t}[(\bar{p}+p')(\bar{u}+u')]+ \\
&\frac{\delta}{\delta x}[(\bar{p}+p')(\bar{u}+u')(u+\bar{u})+(\bar{p}+p')-\tau_{xx}]+ \\
&\frac{\delta}{\delta x}[(\bar{p}+p')(\bar{u}+u')(v'+\bar{v})]+ \\
&\frac{\delta}{\delta x}[(\bar{p}+p')(\bar{u}+u')(w'+\bar{w})-\tau_{zx}]
\end{aligned} \qquad (٤)$$

مدل k-ε درواقع یکی از مدل‌های آشفتگی در حل معادلات پیوستگی و مومنتوم ناویر- استوکس متوسط رینولدزی به‌شمار می‌رود، که بر سه نوع استاندارد، RNG و Realizable می‌باشد. این مدل دارای دو معادله براساس k و ε است. در این مدل k معرف انرژی جنبشی اغتشاش و ε معرف نرخ تلفات انرژی جنبشی اختشاش می‌باشد. چادری [17] معادلات انتقال در مدل RNG را به‌صورت زیر ارائه داده‌است.

$$\frac{\delta}{\delta t}(\rho k)+\frac{\delta}{\delta x_i}(\rho k u_i)= \frac{\delta}{\delta x_i}\left(a_k u_{eff}\frac{\delta}{\delta x_i}\right)+G_K+G_b+\rho\varepsilon-Y_M \qquad (۵)$$

$$\frac{\delta}{\delta t}(\rho\varepsilon)+\frac{\delta}{\delta x_i}(\rho\varepsilon u_i)=\frac{\delta}{\delta x_i}(a_e u_{eff})+ C_{1z}\frac{\varepsilon}{k}(G_k+G_{az}G_b)-C_{2z}\rho\frac{\varepsilon^2}{k}-R_z \qquad (۶)$$

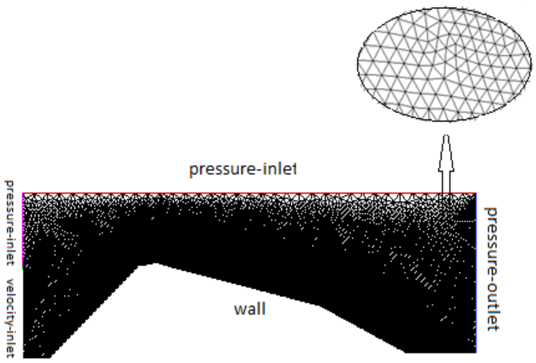
در معادلات مذکور a_ε و a_k به‌ترتیب عکس اعداد اغتشاش پرانتل برای ε و k و μ_{eff}، ویسکوزیتهٔ مؤثر می‌باشند.

برای معادلات مومنتوم، انرژی جنبشی اغتشاش و نرخ استهلاک انرژی اغتشاش، از روش گسسته‌سازی مرتبه‌دوم بالادست و برای معادلهٔ کسر حجمی از روش بازسازی هندسی و برای معادلهٔ فشار از روش PRESTO استفاده شده‌است.

شبکه‌بندی مدل و شرایط مرزی

مدل سرریز سد سورک به‌کمک نرم‌افزار گمبیت و بااستفاده از المان‌های مثلثی مش‌بندی شد. به‌منظور انجام فرایند مستقل از مش سه مدل با تعداد المان‌های ۸۷۴۱۲ و ۷۵۴۳۲ و ٦٤٦٢٤ و ٤٤٦٣١ اجرا شد. در مقایسهٔ نتایج دو مدل اول اختلاف محسوسی وجود نداشت. باکاهش تعداد المان‌های شبکه به ٦٤٦٢٤ و ٤٤٦٣١ سلول اختلاف نتایج مدل فیزیکی و عددی بیشتر گردید. به‌طوری‌که در مدل با تعداد المان ٤٤٦٣١ خطا مدل به‌صورت چشم‌گیری افزایش پیدا کرد؛ به‌همین‌منظور برای کلیهٔ مدل‌ها شبکهٔ یکسان با تعداد المان ۷۵٤۳۲ درنظر گرفته شد و برای شبیه‌سازی دقیق‌تر از المان لایه‌مرزی نیز در شبیه‌سازی عددی استفاده گردید.

شرایط مرزی مدل عددی همانند شرایط مدل فیزیکی درنظر گرفته شد که در شکل (۳) می‌توان نمای شبکه‌بندی مدل و شرایط مرزی را مشاهده نمود.



شکل ۳ شبکه‌بندی و شرایط مرزی درنظر گرفته‌شده برای اجرای مدل عددی

صحت‌سنجی و درصد خطای مدل فلوئنت

برای صحت‌سنجی مدل تعدادی از نتایج آزمایش‌هایی که در واسنجی شرکت داده نشده بودند استفاده گردید. در این تحقیق برای صحت‌سنجی (تشخیص میزان تقارب نتایج محاسبه‌ای و مشاهده‌ای) از معیار نش-ساتکلیف (معادلهٔ ۷) استفاده شد؛ این شاخص در بازهٔ منفی بی‌نهایت و یک تغییرپذیر است و هر چه مقدار آن به عدد ۱ نزدیک باشد بیانگر تقارب بیشتر است و مقادیر کمتر از نیم برای این شاخص نشانهٔ عدم تطابق و تقارب دو دسته داده خواهد بود. میانگین ضریب نش برای داده‌های آزمایشگاهی و عددی در جدول (۱) ارائه شده‌است.

$$RE = 1 - \left(\frac{\left(x_i - x_0\right)^2}{\left(x_i - \bar{x}\right)^2} \right) \quad (۷)$$

در رابطهٔ (۷) RE ضریب نش، x_i : مقدار مشاهده‌ای، x_o: مقدار محاسبه‌ای، $\bar{x}$: میانگین مقدار مشاهده‌ای می‌باشد.

به‌منظور محاسبهٔ درصد خطای مدل فلوئنت نسبت‌به مدل آزمایشگاهی از رابطهٔ (۸) استفاده شده‌است که نتایج آن در جدول (۱) قابل مشاهده است.

$$\Delta d = \left| \frac{d_m - d_l}{d_l} \right| \times 100 \quad (۸)$$

در رابطهٔ فوق d_m مقدار پارامتر اندازه‌گیری‌شده در مدل عددی، d_l مقدار پارامتر محاسبه‌شده در مدل و Δd درصد خطای مدل می‌باشد.

جدول ۱ میانگین ضریب نش- ساتکلیف و میانگین خطا

نام پارامتر	میانگین ضریب نش- ساتکلیف	میانگین درصد خطا
فشار	۰/۸۵	۹/۳
سرعت	۰/۸۷	٤/۳
عمق آب	۰/٦۷	١٦/۹

نتایج و بحث

اندازه‌گیری پارامترهای جریان در مدل فیزیکی در چهار دبی ۷۳/٤۱ و ۱۱۰/۸۰ و ۱۷٦/۷۳ و ۲۳۷/۷٤ مترمکعب بر ثانیه و در ۵۲ موقعیت در امتداد خط وسط و کناره‌های مدل صورت گرفت مدل عددی نیز بااستفاده از بحرانی‌ترین حالت یعنی دبی ۲۳۷/۷٤ مترمکعب بر ثانیه کالیبره و بااستفاده از داده‌های مرتبط با دبی‌های دیگر، مدل صحت‌سنجی شد. درادامه به بررسی نتایج به‌دست‌آمده از مدل فیزیکی و عددی پرداخته شده‌است.

بررسی تغییرات عمق جریان

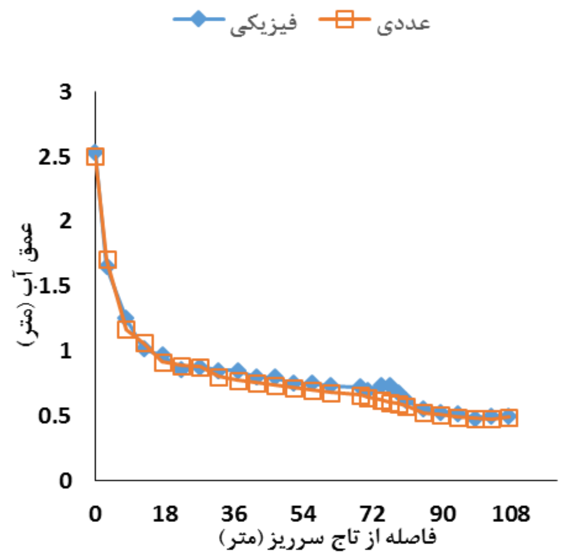
تغییرات عمق آب از تاج سرریز تا انتهای تنداب به‌صورت کاهشی مشاهده گردید. این روند در مدل عددی نیز به همین صورت شبیه‌سازی شد. در چهار دبی ۲۳٤/۷۳، ۱۷٦/۷۳، ۱۱۰/۸۰، ۷۳/٤۱ مترمکعب بر ثانیه مقدار ارتفاع آب نسبت‌به تاج سرریز در مدل فیزیکی پس از تبدیل به نمونهٔ اصلی به‌ترتیب ۲/۵۳، ۲، ۱/۵۷، ۱/۲ متر و در مدل عددی به‌ترتیب ۲/۵۸، ۲/۲، ۱/٦، ۱/۲٤ متر محاسبه گردید که این نتایج نشان می‌دهد مدل عددی به‌ازای دبی‌های فوق دارای بیشترین رصد خطا در کمترین دبی به‌میزان ۱۱/۸٤ بوده‌است. نتایج مدل عددی و مدل فیزیکی باتوجه به میانگین RMSE و NRMSE، در جدول (۱) نزدیک به یکدیگر هستند و می‌توان به نتایج مدل عددی فلوئنت اعتماد کرد. در شکل‌های (٤) و (٦) داده‌های اندازه‌گیری مدل فیزیکی و محاسبات مدل عددی تغییرات عمق جریان در مسیر تنداب نشان داده شده‌است. برای بررسی هم‌خوانی نتایج مدل فیزیکی و عددی در شکل‌های (۵) و (۷) این داده‌ها نسبت‌به خط آرمانی (٤۵ درجه) ترسیم گردید و مدل برازش داده‌ها و هم‌چنین ضریب تعیین آن‌ها (R^2) محاسبه شد که نشان‌دهندهٔ هم‌خوانی قابل قبول آنها می‌باشد. این نتایج نشان که می‌دهد به‌ازای دبی حداقل ضریب تعیین کمتر بوده‌است. در این دبی، مقادیر محاسباتی با مدل عددی ارقام کمتری نسبت‌به مدل فیزیکی به‌دست داده‌است. هم‌چنین براساس معیارهای RMSE و NRMSE همان‌گونه که در جدول (۲) دیده می‌شود، مقادیر این ضریب برای کلیهٔ داده‌ها مقدار قابل قبولی بوده‌است و نشان‌دهندهٔ قابلیت مناسب مدل عددی می‌باشد. شایان ذکر است، با کاهش دبی، میزان خطای مدل افزایش داشته‌است چراکه کالیبراسیون مدل برای دبی حداکثر صورت گرفته‌است.

هم‌چنین نتایج نشان می‌دهند نوسانات عمق آب در کنارهٔ دیوارهٔ تنداب بیشتر از نوسانات در محور مرکزی می‌باشد. کلیهٔ اندازه‌گیری‌ها نشان می‌دهند دیواره‌های هدایت سرریز و تنداب از نظر طراحی کفایت لازم را برای عبور آب دارند. موضوع دیگر

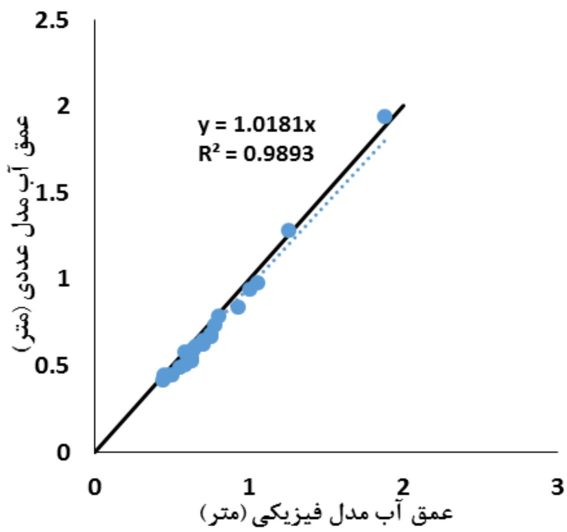
مسئلهٔ جدایش جریان در محل تغییر شیب است که در کلیهٔ آزمایش‌ها، نتایج نشان می‌دهند در قسمت تغییر شیب ناگهانی مدل هیچ‌گونه جدایش جریان از سطح مشاهده نگردید اما در آزمایش‌های با دبی‌های مختلف، در ابتدای شیب دوم به‌دلیل اختلاط زیاد آب و هوا مقداری عمق آب افزایش پیدا کرده‌است.

جدول ۲ مقدار RMSE و NRMSE نتایج عمق آب به‌دست‌آمدهٔ مدل عددی نسبت‌به اندازه‌گیری‌های مدل فیزیکی

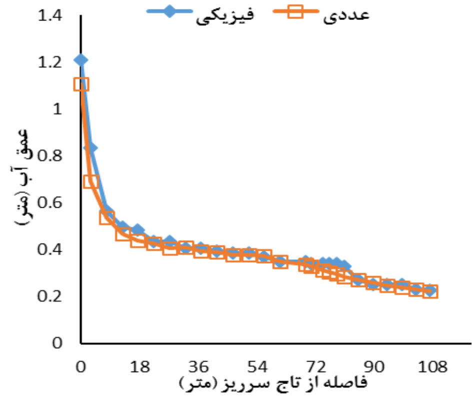
Q(m³/s)	۲۳٤/۷۳	۱۷۶/۷۳	۱۵۱/۸	۱۱۰/۸	۷۳/۴۱
RMSE (متر)	۰/۰۵۹	۰/۰۵۹	۰/۰۵۸	۰/۰۶۳	۰/۰۶۳
NRMSE (٪)	۶/۹۸	۸/۱۲	۱۰/۰۸	۱۱/۷۷	۱۱/۸٤



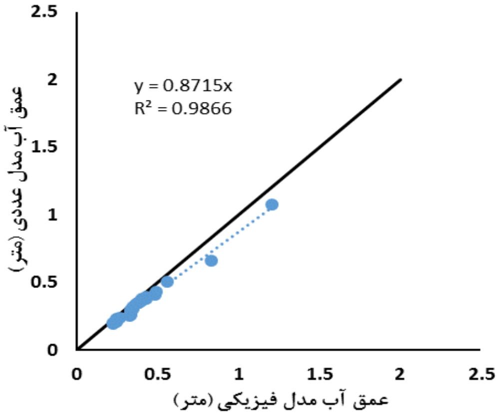
شکل ٤ تغییرات سطح آب در مدل فیزیکی و عددی به‌ازای دبی حداکثر



شکل ۵ مقایسهٔ داده‌های عمق آب در مدل فیزیکی و مدل عددی به‌ازای دبی حداکثر



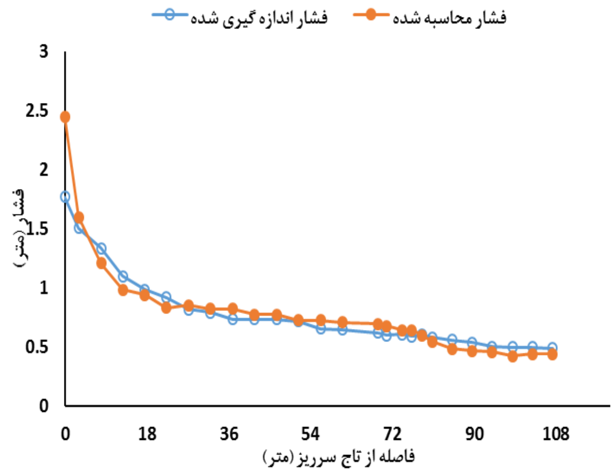
شکل ٤ تغییرات سطح آب در مدل فیزیکی و عددی به‌ازای دبی حداکثر



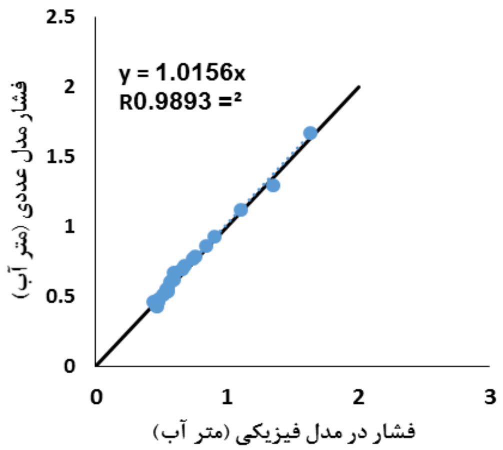
شکل ۷ مقایسهٔ داده‌های عمق آب در مدل فیزیکی و مدل عددی به‌ازای دبی حداقل

بررسی توزیع فشار

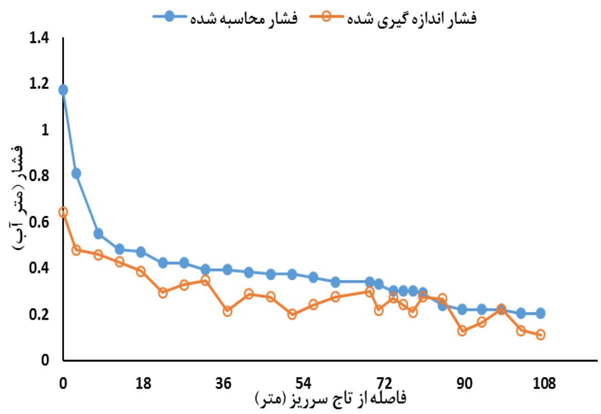
اندازه‌گیری فشار به‌وسیلهٔ پیزومتر انجام شد و ٥١ موقعیت برای اندازه‌گیری پارامتر انتخاب گردید. این موقعیت‌ها به‌صورتی بود که ٢٦ ایستگاه در محور مرکزی و ٢٥ ایستگاه در محور کنارهٔ دیواره در فاصلهٔ ۳ سانتی‌متری مدل فیزیکی یا ۱/۵ متری نمونهٔ اصلی اندازه‌گیری شد. شکل‌های (۸) و (۱۰) فشار را برروی سرریز در محور مرکزی تنداب به‌ترتیب به‌ازای دبی‌های حداقل و حداکثر نشان می‌دهند. روند هر دو نمودار مشابه بوده و از تاج تا پای تنداب مقدار فشار کاهش پیدا کرده‌است. روند نمودارها در این شکل‌ها نشان می-دهد که در پیزومترهای شمارهٔ ۱ تا ۳ مقدار فشار با شیب تندتر کاهش پیدا کرده‌است و به‌نظر می‌رسد علت آن افت سطح آب از تاج سرریز به قسمت تنداب باشد. کاهش فشار در طول مدل فیزیکی سرریز سد سورک به‌صورتی بود که در هیچ‌یک از موقعیت‌های نصب پیزومتر، فشار منفی مشاهده نگردید. باتوجه به وجود سرعت‌های بالا در این تنداب اگر در بتن این قسمت درز و شکاف و ناهمواری به‌وجود آید، ایجاد فشار منفی که زمینه‌ساز کاویتاسون می‌باشد دور از انتظار نیست. علاوه‌بر آن هرچه دبی کاهش پیدا کرده‌است نوسانات مقدار فشار در طول سرریز افزایش پیدا کرده‌است. این نوسانات از دبی چهارم به بعد نمایان‌تر شده‌است. احتمال می‌رود باتوجه به این نکته که با کاهش دبی، عمق آب نیز کاهش پیدا کرده‌است، عملکرد پیزومترها برای اندازه‌گیری فشار در عمق کم و سرعت بالا، کاهش یافته‌است. همچنین در کلیهٔ دبی‌ها نوسانات فشار در طول سرریز در محور مرکز کمتر از محور کناری بوده‌است و علت این نکته می‌تواند علاوه‌بر ضعف پیزومتر در اندازه‌گیری فشارهای کم تأثیر دیواره‌های هدایت و امواج عرضی (cross wave) تولیدشده برروی جریان و سطح آب باشد که در اندازه‌گیری پارامتر فشار، در سرعت بالا تأثیر داشته‌اند. همچنین برای بررسی هم خوانی نتایج مدل فیزیکی و عددی در شکل‌های (۱۰) و (۱۱) این داده‌ها نسبت‌به خط آرمانی (٤٥ درجه) ترسیم و مدل برازش داده‌ها و همچنین ضریب تعیین آنها (R^2) محاسبه شد که نشان‌دهندهٔ هم‌خوانی قابل قبول آنها می‌باشد. این نتایج نشان می‌دهند به‌ازای دبی حداقل ضریب تعیین کمتر بوده‌است. در این دبی، مقادیر محاسباتی با مدل عددی ارقام بیشتری نسبت‌به مدل فیزیکی به‌دست داده‌است. همچنین براساس معیارهای RMSE و NRMSE همان‌گونه که در جدول (۳) دیده می‌شود، مقادیر این ضریب برای کلیهٔ داده‌ها مقدار قابل قبولی است و نشان‌دهندهٔ قابلیت مناسب مدل عددی می‌باشد. شایان ذکر است، با کاهش دبی، میزان خطای مدل افزایش داشته‌است چراکه کالیبراسیون مدل برای دبی حداکثر صورت گرفته‌است.



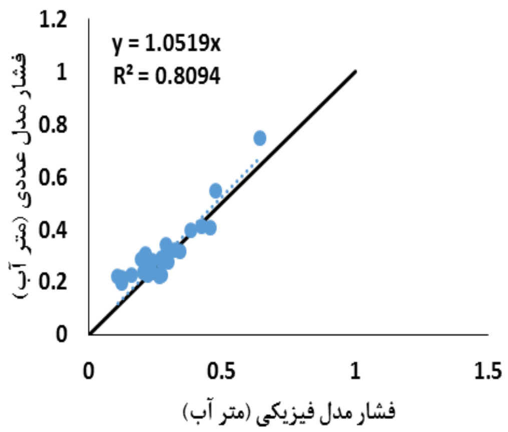
شکل ۸ تغییرات فشار اندازه‌گیری‌شده و فشار محاسبه‌شده به‌ازای دبی حداکثر



شکل ۹ مقایسه داده‌های فشار در مدل فیزیکی و عددی به‌ازای دبی حداکثر



شکل ۱۰ تغییرات فشار اندازه‌گیری‌شده و فشار محاسبه‌شده به‌ازای دبی حداقل



شکل ۱۱ مقایسهٔ داده‌های فشار در مدل فیزیکی و عددی به‌ازای دبی حداقل

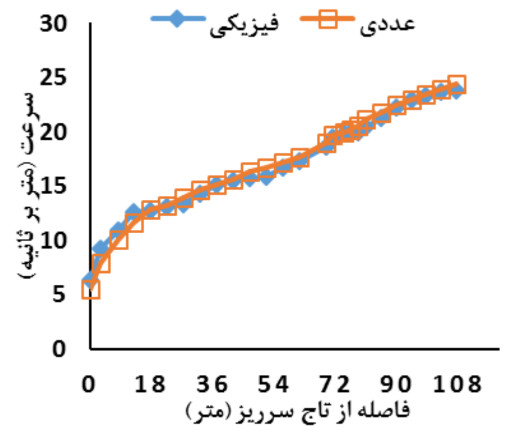
جدول ۳ مقدار RMSE و NRMSE نتایج فشار به‌دست‌آمده در مدل عددی نسبت‌به اندازه‌گیری‌های مدل فیزیکی

Q (m³/s)	۲۳۴/۷۳	۱۷۶/۷۳	۱۵۱/۸	۱۱۰/۸	۷۳/۴۱
RMSE (متر)	۰/۰۴۱	۰/۰۴۳	۰/۰۴۸	۰/۰۵۱	۰/۰۵۹
NRMSE(٪)	۵/۳۴	۶/۳۷	۸/۵۵	۱۱/۶۵	۱۶/۱۴

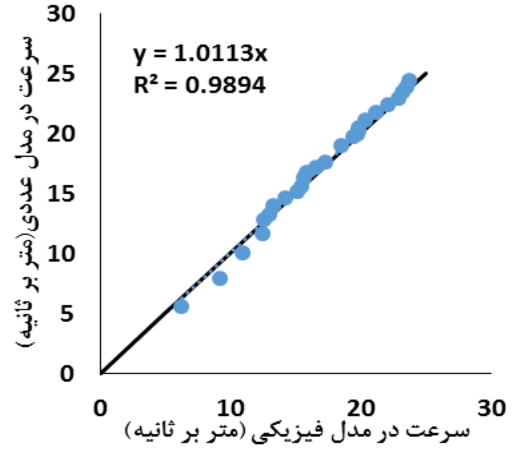
بررسی تغییرات سرعت

شکل‌های (۱۲) و (۱٤) تغییرات سرعت جریان را برروی سرریز در محور مرکزی تنداب به‌ترتیب به‌ازای دبی‌های حداقل و حداکثر نشان می‌دهند. روند هر دو نمودار مشابه بوده و از تاج تا پای تنداب مقدار سرعت افزایش پیدا کرده‌است. باتوجه به این نتایج، بعد از تغییر شیب ناگهانی تنداب، سرعت جریان با آهنگ تندتری افزایش یافته‌است. بیشترین سرعت اندازه‌گیری‌شده در دبی ۲۳٤/۷۳ و در فاصلهٔ ۱۰۷/۳ متری از تاج سرریز به‌دست آمده‌است و مقدار آن در مدل فیزیکی ۲۳/۱۰ متر بر ثانیه اندازه‌گیری شده‌است. این مقدار در مدل عددی فلوئنت معادل ۲٤/۵۸ متر بر ثانیه محاسبه گردید که نشان‌دهندهٔ خطای ٦/٤ درصدی در مدل عددی است. وجود سرعت‌های بالا در این تنداب درصورتی‌که در بتن این قسمت درز و شکاف و ناهمواری به‌وجود آید، زمینه‌ساز وقوع کاویتاسون می‌باشد. همچنین برای بررسی هم‌خوانی نتایج مدل فیزیکی و عددی در شکل‌های (۱۳) و (۱۵) این داده‌ها نسبت‌به خط آرمانی (٤٥ درجه) ترسیم گردید و مدل برازش داده‌ها و همچنین ضریب تعیین آنها (R^2) محاسبه شد که نشان‌دهندهٔ هم‌خوانی قابل قبول آنها می‌باشد. این نتایج نشان می‌دهند که به‌ازای دبی حداقل ضریب تعیین کمتر بوده‌است. همچنین براساس معیارهای RMSE و NRMSE همان‌گونه که در جدول (٤) دیده می‌شود، مقادیر این ضریب برای کلیهٔ داده‌ها مقدار قابل قبولی است و نشان‌دهندهٔ قابلیت مناسب مدل عددی می‌باشد. شایان ذکر است با کاهش دبی، میزان خطای مدل افزایش داشته چراکه کالیبراسیون مدل برای دبی حداکثر صورت گرفته‌است.

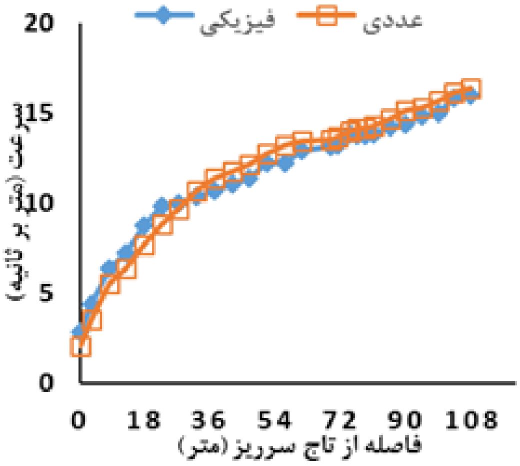
باتوجه به میانگین ضریب نش- ساتکلیف و میانگین درصد خطای داده‌های سرعت، در جدول (۱) نتایج عددی تشابه خوبی با مشاهدات آزمایشگاهی داشته‌است. شکل‌های (۱۱ و ۱۲) مقایسهٔ نتایج سرعت در مرکز و دیواره را نشان می‌دهد. به‌دلیل نوسانات موجود در کنارهٔ دیوارهٔ مدل نتایج اندازه‌گیری‌شده در محور مرکزی دارای ضریب تعیین (R^2) بهتری می‌باشد.



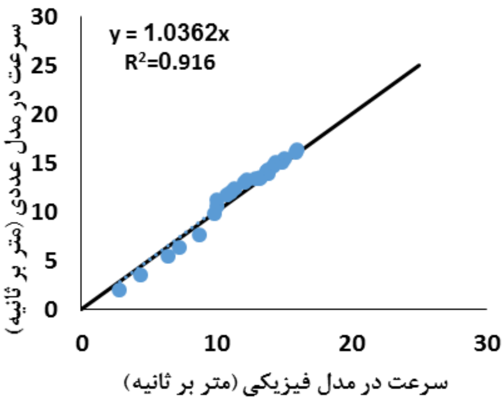
شکل ۱۲ تغییرات سرعت در مدل فیزیکی و عددی (دبی اول)



شکل ۱۳ مقایسهٔ داده‌های سرعت در مدل فیزیک و عددی (دبی اول)



شکل ١٤ تغییرات سرعت در مدل فیزیکی و عددی (دبی پنجم)



شکل ۱۵ مقایسهٔ داده‌های سرعت در مدل فیزیکی و عددی (دبی پنجم)

جدول ٤ مقدار RMSE و NRMSE نتایج سرعت به‌دست‌آمده در مدل عددی نسبت‌به اندازه‌گیری‌های مدل فیزیکی

$Q(m^3/s)$	۲۳۴/۷۳	۱۷۶/۷۳	۱۵۱/۸	۱۱۰/۸	۷۳/۴۱
RMSE	۰/۵۷	۰/۷۲	۰/۷۸	۰/۸۷	۰/۷۹
NRMSE	۳/٤	٥/۲	٦/۷	٦/٦	٦/۸

نتیجه‌گیری

با بررسی نتایج مدل فیزیکی و عددی می‌توان به نتایج زیر دست یافت:

۱. با اندازه‌گیری و محاسبهٔ فشار در ٤ دبی متفاوت به‌ویژه دبی طرح، در طول سرریز سد سورک هیچ‌گونه فشار منفی مشاهده و محاسبه نگردید.

۲. بررسی پارامتر عمق جریان در ۲٦ موقعیت مورد نظر در مسیر تنداب سرریز سورک نشان می‌دهد که دیواره‌ها هدایت کفایت لازم را برای عبور دبی طرح دارند و در مکان تغییر شیب ناگهانی جدایش جریان وجود ندارد.

۳. در این پژوهش در بین پارامترهای اندازه‌گیری‌شده، نرم‌افزار فلوئنت پارامتر سرعت را با کمترین میانگین در صد خطا (٤/۳ در صد) و پارامتر عمق را با بیشترین میانگین درصد خطا (١٦/٩ درصد) شبیه‌سازی نمود.

۴. ضریب نش- ساتکلیف و ضریب تعیین محاسبه‌شده برای پارامترهای موردنظر در محـدودهٔ قابـل قبـولی توانایی نرم‌افزار فلوئنت را برای شبیه‌سـازی جریـان برروی سرریزهای با تغییر شیب ناگهانی اثبات مـی-کنند. باتوجه به ضریب تعیـین بـه‌دسـت‌آمـده بـرای داده‌های مدل عددی، مشخص گردیـد مـدل عـددی پارامترهای محور مرکزی تنداب را با دقـت بیشـتری نسبت‌به داده‌های کنارهٔ دیواره شبیه‌سازی نموده‌است.

۵. باتوجه به نتایج شبیه‌سازی‌شده و معیارهای RMSE و NRMSE می‌توان ادعا نمود در نرم‌افزار فلوئنت بااستفاده از روش حجم محدود، مدل آشفتگی k-ε، RNG، روش تصیح فشار SIMPLE و روش دو فازی VOF به‌خوبی می‌توان پارامترهای فشار، سرعت و عمق آب را برای بررسی تنداب‌های با تغییر شیب ناگهانی شبیه‌سازی نمود. هم‌چنین از مدل فلوئنت واسنجی‌شده در این تحقیق می‌توان برای بهبود عملکرد سرریز و تنداب سد سورک استفاده نمود.

سپاس‌گزاری

تحقیق حاضر با حمایت معاونت پژوهشی دانشگاه شهرکرد به انجام رسید که بدین‌وسیله مراتب تشکر و قدردانی اعلام می‌گردد.

مراجع

1. Ozemtsev , Y. P., "Cavitation Destruction of Concrete and Protective Facings under Natural Conditions", Power Technology and Engineering, Vol. 3, No.1, Pp.24-29, (1969).
2. U.S. Department of the Interior Bureau of Reclamation (USBR), Design of Small Chanel. 3rd edn. USA 860p, (1978).

۳. مهری، م، «مدل‌سازی رفتار هیدرولیکی جریان روی سرریز سد بالارود با مقیاس کوچک»، پایان‌نامهٔ کارشناسی ارشد، دانشکدهٔ علوم و مهندسی آب، دانشگاه شهید چمران، اهواز، (۱۳۸۵).

۴. عارف پور، م.، «بررسی هیدرودینامیک جریان و منحنی تراژکتوری جت پایین‌دست در پرتابهٔ جامی‌شکل (مطالعهٔ موردی سد بالارود)»، پایان‌نامهٔ کارشناسی ارشد، دانشکدهٔ علوم و مهندسی آب، دانشگاه شهید چمران، اهواز، (۱۳۸۸).

۵. دورقی، ا.، «رفتار هیدرولیکی آب برروی سرریز اوجی سه‌دهانه و تعیین رابطهٔ دبی- اشل و بهینه‌سازی دیـواره‌هـای هـدایت (مطالعـهٔ موردی سد بالارود)، پایان‌نامهٔ کارشناسی ارشد، دانشکدهٔ علوم و مهندسی آب، دانشگاه شهید چمران، اهواز، (۱۳۸۸).

6. Savage, M. And Johnson, "Flow over Ogee Spillway: Physical and Numericalmodel Case Study", *Journal of Hydraulic Engineering*, Vol. 127, No.8, Pp. 640-649, (2001).
7. Cassidy, J. J., "Irrotational Flow over Spillways of Finite Height", *Journal of Hydraulic Engineering*, Division ASCE, Vol. 91, No.6, Pp.155-173, (1965).
8. Olsen, N. R. B. And Kjellesvig, H. M., "Three Dimensional Numerical Flow Modeling for Estimation of Spillway Capacity, USA", *Journal of Hydraulic Research.* Vol. 36, No.5, Pp.775-784, (1998).
9. Unami, K., Kawachi, T., Munir Babar, M. and Itagaki, H., "Two Dimensional Numerical Model of Spillway Flow", *Journal of Hydraulic Engineering*, Vol. 125, No.4, Pp.369-375, (1999).

10. Chinnarasri, D. K and Pierre, Y., "Model of Flow over Spillways by Computational Fluid Dynamics", Proceedings of the Institution of Civil Engineers, Vol. 167, No.3, Pp. 164-175, (2012).

۱۱. حیدری، م. «شبیه‌سازی جریان برروی سرریز اوجی بااستفاده از نرم‌افزار فلوئنت»، پایان‌نامهٔ کارشناسی ارشد، دانشگاه تربیت مدرس.

12. Gonzalez, A.C. and Chanson, H "Scale effects in moderate slope stepped spillways experimental studies in air-water flows", *In The 8th National Conference on Hydraulics in Water Engineering*, Gold Coast, Australia, (2004).

13. Boes, R. and Hager, W. H., "Two-phase characteristics of stepped spillways", *Journal of Hydraulic Engineering*, Vol. 129, No.9, Pp. 661–670, (2003).

14. Chen, Q. Dai, G. and Liu, H. "Volume of fluid model for turbulence numerical simulation of stepped spillway overflow", *Journal of Hydraulic Engineering*, Vol. 128: Pp. 683-688, (2002).

15. Dargahi, B., "Experimental Study and 3D Numerical Simulations for a Sree over Flow Spillway", *Journal of Hydraulic Engineering*, Vol. 132, pp. 899-907, (2004).

16. Anderson, D., Tannehill, J. and Pletcher, R., "Computational Fluid Mechanics and Heat Transfer.Hemisphere Publishing Corporation", New York, (1984).

17. Chaudhury, D., "Introduction to the Renormalization Group Method and Turbulence Modeling. Fluent Inc", Technical Memorandum TM-107, (1993).